

氏 名	椎 名 徹
生 年 月 日	
本 籍	富山県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	博乙第212号
学位授与の日付	平成12年3月22日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	画像処理手法を用いた降雪粒子の落下運動解析に関する研究
論文審査委員(主査)	村本健一郎(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	長野 勇(工学部・教授) 橋本 秀雄(工学部・教授) 松浦 弘毅(工学部・教授) 米田 政明(富山大学大学院・教授)

学 位 論 文 要 旨

ABSTRACT

In analyzing images of snow particles using image processing, the diameters and fall velocities were measured. The average density of snow particles was calculated using the total volume of snow and snowfall rate every minute. Relations between diameters of falling snow particles and melted diameters were calculated. These relations were also estimated by the Reynolds number and the drag coefficient. The formula for fall velocity and density was calculated using these physical parameters. Snowfall rate could be determined from only image processing data.

It is important to classify a snowfall particle into snowflakes and graupels to analyze the relation between radar reflectivity factor and snowfall rate. To measure the shape and terminal velocity of snow particles quantitatively, two images of the same particle were photographed using two CCD cameras with two different shutter speeds and continuously fed into an image processor. A snowfall particle was classified by using the fall velocity and the shape characteristics into snowflakes and graupels, and the percentage of graupel content was calculated every minute. The shape of a snowflake and its falling motion were analysed using sequential photographed image frames. The falling motion of a snowflake was calculated by tracing its position in subsequent frames. Relationships between shape and motion parameters were analysed.

降雪の発生機構の解明や降雪予測を行うために、気象レーダや衛星を用いた降雪雲の観測が行われている。降雪粒子は上空の降雪雲から複雑な生成・成長過程

を経て、地上付近に落下してくる。地上付近での降雪粒子と降雪雲を同時に観測することは、粒子の生成・成長過程の解明や詳細な降雪予測を行う上で重要である。地上付近の観測では、降雪粒子の落下現象や形状、落下速度、密度等の物理量の測定が不可欠であり、短い時間間隔で長期間、連続的に自動測定する必要がある。

本論文では、地上付近での降雪粒子の落下運動を解析することを目的として、画像処理手法を用いて降雪粒子の物理量を測定する方法を確立し、降雪量を表す指標として、降雪強度、積雪量を自動計測するシステムを構築する。本論文は、画像処理手法を用いた降雪粒子観測システムに関する章、測定・解析する物理量に関する章および降雪粒子観測システムとレーダによる反射強度測定を組合わせた降雪定量観測に関する章からなる。

画像処理手法を用いて、落下中の個々の降雪粒子の粒径と落下速度を測定し、1分を最小単位とする降雪情報を得る自動計測システムをこれまで開発してきた。これにより、1分ごとの降雪粒子の空間数密度、平均粒径、平均落下速度の高速検索は可能となった。しかし、単位時間ごとの平均値のみを取り扱ったため、粒径分布および落下速度分布等の統計処理・解析を行うことは不可能であった。第2章では、CCDカメラを使って降雪粒子映像を撮影し、映像を画像処理して得られた降雪粒子観測データから3種類のデータ構造（シーケンシャル型、階層型およびリレーショナル型）を作成し、降雪粒子解析用のデータベースを構築した。シーケンシャル型はリアルタイムで可変長データを格納する場合において優れた構造であり、降雪粒子のリアルタイム観測に使用した。また、時間系列で降雪状況の高速検索を行う場合には、階層型のデータベースが適していた。このデータベースは各種の降雪状況の把握に優れている。しかし、1分ごとの空間数密度等のマクロな情報は検索できるが、個々の降雪粒子に関係した雪質を解析する場合にはこのデータベースでは不十分であった。そこで、粒径と落下速度をキーとしたリレーショナル型データベースを作成し、これを用いた降雪粒子の検索から、粒径と落下速度分布をもとにあられと雪片の分類が可能であることを示した。

降雪粒子の雪質は、気象条件により短期間で変動するため、より詳細な解析が

必要である。地上付近の粒子から得られる落下速度は、その雪質と大きく関係している。そこで落下速度分布の時間変化を調べたところ、1降雪のなかでも変動していることが本データベースを利用して確認できた。

地上付近の降雪粒子の落下運動を解析することは、粒子生成のメカニズムを解明する上で重要である。特に落下中の降雪粒子の落下速度、粒径、密度を同時に測定することは、落下形態を定量的に解析するために必要である。第3章では、第2章のデータベースと電子天秤法による降雪強度から降雪粒子の平均密度を算出し、1分ごとの観測データの平均量から降雪粒子の落下現象の定量的な解析を行う。最初に、画像処理手法によって観測された降雪粒子のデータの中から1分ごとの平均粒径、落下速度および平均密度データを抽出し、粒径と密度の相関から落下中の粒径と融解直径の関係を導いた。次に、この関係を利用して、粒径 d を変数とした落下速度の式 $v = \kappa \cdot d^\varepsilon$ を融解直径 D を変数とした落下速度の式 $v = k \cdot D^n$ に変換し、両式のパラメータの変換式を求めた。これにより直接 Langleben の値と比較することが可能になった。更に、Reynolds 数と抵抗係数を1分ごとに求め、これらの物理量が落下中の降雪粒子の落下速度と粒径および融解直径の間に与える影響を調べた。Reynolds 数と抵抗係数の回帰式からパラメータ a , j が落下速度のパラメータ k , n および κ , ε に影響することがわかり、各値を求めた。最後にこれらを考慮して、画像処理手法により得られた落下中の降雪粒子の観測データのみを利用して降雪強度を求めたところ、良好な結果が得られた。

第4章では、流体力学により一つの降雪粒子の落下速度と物理量との関係を求め、個々の降雪粒子の粒径と落下速度から各々の密度を計算する方法を提案する。更に、短い時間間隔で連続的に降雪強度を自動測定することを目的として、画像処理手法による降雪粒子の観測データのみを用いて降雪強度を算出する方法を提案し、その有効性を調べた。その結果、本手法により得られた降雪強度は、電子天秤法による値とよく一致し、画像処理手法による降雪強度の自動測定が可能であることが確認された。また、粒径ごとの降雪割合から、画像処理法による降雪観測装置の分解能が妥当であることが確認された。更に、第3章の平均密度と本章の個々の粒子の密度とを比較し、両者の関係を求めた。

電子天秤による降雪強度の測定は、天秤の最大秤量に達する前に天秤に降り積もった雪を人手により取り除く必要がある。また、風の影響により天秤の重量が変化し、これにより測定精度が制限された。落下中の粒子の粒径と落下速度を測定する本手法を用いることにより、降雪強度の自動測定が冬季期間連続して可能であり、年間降水量を求めることが可能である。

レーダ反射因子と降雪強度の関係を解析するためには、降雪粒子に含まれる雪片とあられの割合を知ることが重要である。第5章では、シャッタースピードおよび倍率の異なる2台のCCDカメラを用いて同一の降雪粒子を同時に撮影し、個々の粒子映像を画像処理して、雪片とあられに自動分類する手法を提案する。最初に、雪片とあられの落下速度と形状の特徴量をそれぞれ抽出した。降雪粒子の落下速度を得るため、1台のCCDカメラのシャッタースピードを低速の1/60秒に設定し、その残像と粒径を用いて落下速度分布を求めた。このカメラの視野は比較的大きな範囲に設定して、粒径分布も同時に求めた。次に、形状特徴量を求めるためにもう1台のカメラのシャッタースピードを高速の1/8000秒に設定し、視野を前述のカメラに対して1/5の大きさに設定した。2値画像と濃淡画像から物理的特徴量を抽出したところ、あられと雪片の分布の違いが濃淡画像を用いることにより明瞭になった。これら落下速度と形状の特徴量を判別関数に用いて、個々の降雪粒子を雪片とあられに分類し、1分ごとに雪片とあられの含まれる割合を求め、その有効性を示した。目視によるあられと雪片の観測は、ビロード布上に降った降雪粒子を人手により解析するため時間と労力を要する。また、1回のサンプル数が少なく、サンプリング間隔が長いため誤差を伴うため、あまり利用されていなかった。本システムを利用することにより、冬期期間連続してあられと雪片の自動分類が可能となった。また、北陸・信越地方の降雪では、あられまたは雪片が別々に降ることはまれで、両者が混ざりあって降る場合がほとんどである。あられと雪片ではそれぞれのレーダ反射強度が異なるため、全降雪粒子に対するあられの割合を求めることにより、レーダ観測を用いた積雪・降雪量推定に役立つことが期待される。

降雪雪片の衝突併合成長には、雪片同士の落下速度の相違や雪片が落下すると

きの揺らぎが関係しているので、雪片の落下運動の解析は重要である。この運動を解析するための技術の一つとして、雪片の落下運動を連続的に撮影し、画像処理する方法がある。第6章では、水平同一方向からシャッタースピードおよび撮影視野の設定が異なる2台のCCDカメラを用いて、降雪雪片の形状と落下運動を同時撮影し、連続した映像をオンラインで画像処理するシステムを作成した。雪片の落下姿勢とその変動および形状特徴量の解析を行うために、落下中の雪片を狭い視野にて数フィールド連続して撮影した。また、広い視野を撮影した映像には狭い視野で撮影された雪片と同一の雪片が約20フィールド連続して観測されるので、その雪片の落下軌跡を追跡することにより落下運動を解析した。落下運動の特徴量として平均移動比と平均角度変動量を定義し、形状特徴量と落下姿勢および落下運動の変化の関係を求めた。その結果、落下の過程で雪片同士が衝突・併合を繰り返すにつれて、水平方向に雪片が次第に成長して大きくなり、複雑な形状の雪片に発達することが確認された。また、小さな雪片は断面積の大きな雪片に比べて水平方向への移動速度が大きく、水平方向での雪片同士の衝突・併合に貢献し、大きな雪片は落下速度が大きいため、鉛直方向での雪片同士の衝突・併合に寄与することがわかった。本システムを用いることにより、個々の雪片の形状特徴量と落下運動および落下速度のオンライン自動測定が可能となった。

気象レーダによる降水粒子の観測は、集中豪雨による災害監視、積雪融水を利用した水資源の推定等に重要である。第7章では、小型ドップラーレーダを用いた反射因子(Z)の測定と地上での降雪強度測定(R)を短い時間間隔で同期測定し、降雪時の Z - R 関係を求めた。この測定と同時に第2章の降雪粒子観測装置を併用して、地上付近での落下中の降雪粒子の空間数密度、粒径、落下速度、平均密度を同じ時間間隔で測定し、降雪粒子の物理量が Z - R 関係に及ぼす影響について解析した。レーダの反射因子を画像処理データから求め、天秤の降雪強度および受信電力との関係を求めた。受信電力と反射因子は比例するが、平均密度によって異なる曲線群になった。また、降雪強度と受信電力から Z - R 関係を解析したところ、平均密度、降雪粒子の種類によって Z - R 関係に相違がみられた。降雪粒子の特徴量に基づいた Z - R 関係の対応づけが有効であると考えられる。今後、受信電

力のパワースペクトルと第4章の個々の粒子の質量を利用して、1分ごとのZ-R関係を解析し、降雪粒子の特徴量別の詳細な B , β を求めることが可能である。

最後に、第8章にて本論文全体の結論と今後の研究課題について記述する。

学位論文審査結果の要旨

平成11年11月30日の第1回論文審査委員会、および同12月15日の口頭発表と第2回論文審査委員会において審査した結果、以下の通り判定した。

本論文は、画像処理手法を用いて、落下中の降雪粒子の落下運動を定量的に解析する手法を開発し、さらに実際に観測を行い、その有効性を確かめている。以下にその内容を要約する。

まず、CCDカメラを用いて撮影された落下中の降雪粒子の映像を2値画像として処理し、粒径および落下速度をキーとして検索可能なレーショナルデータベースを構築している。次に、シャッタースピードおよび倍率の異なる2台のCCDカメラを用いて同一の降雪粒子を同時に撮影し、個々の粒子映像を2値および濃淡画像として画像処理し、雪片とあられに自動分類する手法を提案している。さらに、降雪粒子映像を連続的に撮影することにより、粒子の落下姿勢とその変動および形状特徴量と落下運動の関係を解析している。これにより、落下中の粒子同士の衝突・併合過程を定量的に推定することが可能になった。また、これらの応用として、ドップラーレーダを用いた反射因子(Z)と地上での降雪強度(R)とを同期観測し、降雪粒子の画像から得られた物理的特徴量がZ-R関係に及ぼす影響を明らかにしている。

以上の研究成果は、画像処理の新しい分野への適用としての学術的価値が高く、また、気象レーダや衛星を用いた降雪の発生機構の解明や降雪予測へも応用でき、本論文は博士論文に値するものと判定する。